

Trabajo fin de Grado

Ingeniería Aeroespacial

Variación de la resistencia de una lámina unidireccional de grafito-epoxy sometida a tracción fuera de ejes (10°) con el ratio del especimen

Autor: Alberto Baro Parra

Tutores: Juan Carlos Marín Vallejo, Jesús Justo Estebaranz y
José Cañas Delgado

**Dep. Mecánica de los Medios Continuos y
Teoría de Estructuras
Escuela Técnica Superior de Ingeniería
Universidad de Sevilla**

Sevilla, 2017



Trabajo fin de Grado
Ingeniería Aeroespacial

**Variación de la resistencia de una lámina
unidireccional de grafito-epoxy sometida a tracción
fuera de ejes (10°) con el ratio del especimen**

Autor:

Alberto Baro Parra

Tutores:

Juan Carlos Marín Vallejo

Jesús Justo Estebanz

José Cañas Delgado

Dep. Mecánica de los Medios Continuos y Teoría

de Estructuras

Escuela Técnica Superior de Ingeniería

Universidad de Sevilla

Sevilla, 2017

Trabajo fin de Grado: Variación de la resistencia de una lámina unidireccional de grafito-epoxy sometida a tracción fuera de ejes (10°) con el ratio del especimen

Autor: Alberto Baro Parra

Tutores: Juan Carlos Marín Vallejo
Jesús Justo Estebaranz
José Cañas Delgado

El tribunal nombrado para juzgar el Proyecto arriba indicado, compuesto por los siguientes miembros:

Presidente:

Vocales:

Secretario:

Acuerdan otorgarle la calificación de:

Sevilla, 2017

El Secretario del Tribunal

A mi familia

A mis maestros

Agradecimientos

En primer lugar, agradecer a todas las personas que me han apoyado durante todos estos años, sin los cuales no podría haber conseguido llegar hasta aquí.

Han sido años duros, tanto a nivel de conocimientos como a nivel de esfuerzo, pero no han sido en vano. Ha sido una experiencia inolvidable que, sin dudarlo, volvería a repetir.

Por todo ello, me gustaría agradecer y dedicar este trabajo a mis tutores a lo largo del mismo, Jesús Justo, Juan Carlos Marín y José Cañas, los cuales confiaron en mí para llevar a cabo este proyecto y me han proporcionado la oportunidad de conocer a un grupo maravilloso de personas. Por tanto, agradecer a Miguel que ha estado siempre ahí para apoyarme y ayudarme a llevar a cabo todo el proceso de fabricación.

Por otro lado, a todos mis compañeros de los cuales me siento afortunado de haberlos conocido. Gracias por todos esos momentos que nunca olvidaré.

Por último, a mi familia, en especial a mi madre, mi abuela y mis hermanos, que me han apoyado y han creído en mí desde el principio. Por supuesto sin olvidar a mi padre, el cual siempre creyó en mí y al que siempre estaré agradecido.

El proyecto ha sido desarrollado en el Grupo de Elasticidad y Resistencia de Materiales de la Universidad de Sevilla. Una de las corrientes de investigación es el ámbito de los materiales compuestos, en el cual se basa este trabajo.

En concreto nos centramos en la caracterización del material a cizalladura y en determinar una serie de propiedades que iremos describiendo a lo largo del mismo. Por ello, nos basamos en el ensayo de tracción “Off-Axis” para la realización de los ensayos y poder así, obtener los parámetros de interés bajo estudio.

Por tanto, se basa en un proyecto experimental en el que se analiza la variación de la resistencia en función del ratio del espécimen, así como, la variación en función de la zona de agarre de las mordazas.

Agradecimientos	ix
Resumen	xi
Índice	xiii
Índice de Tablas	xv
Índice de Figuras	xvii
Notación	xix
1 Introducción y antecedentes	1
1.1 Objetivos	<i>¡Error! Marcador no definido.</i>
1.2 Antecedentes	3
1.3 Objetivos	7
1.4 Contenido	7
1.5 Definición de la geometría	7
2 Fabricación de los especímenes	11
2.1 Introducción	11
2.2 Corte, apilado y curado	11
2.3 Colocación de los tacones	14
2.3 Corte de las probetas	15
3 Ensayos y resultados	19
3.1 Introducción	19
3.2 Variación con el ratio del especimen	19
3.3 Variación con el agarre de la mordaza	26
4 Análisis	31
4.1 Introducción	31
4.2 Variación con el ratio del especimen	31
4.3 Variación con el agarre de la mordaza	36
5 Conclusiones	38
5.1 Introducción	38
5.2 Ratio del especimen	38
5.3 Agarre de la mordaza	38
Referencias	39

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1–1. Propiedades de ciertos materiales
Tabla 1–2. Propiedades de matrices
Tabla 3–1. Dimensiones de las probetas
Tabla 3–2. Resultados de los ensayos, E_x y G_{12} tangentes.
Tabla 3–3. Módulos secantes E_x y G_{12} .
Tabla 3–4. Dimensiones de las probetas
Tabla 3–5. Resultados de los ensayos, E_x y G_{12} tangentes.
Tabla 3–6. Módulos secantes E_x y G_{12} .
Tabla 4–1. Propiedades medias.
Tabla 4–2. Comprobación de cálculos.
Tabla 4–3. Comprobación de ángulos.
Tabla 4–4. Ángulos medios.
Tabla 4–5. Varicación de las propiedades.
Tabla 4–6. Tensiones tangenciales de rotura.
Tabla 4–7Comprobación de zona de rotura.
Tabla 4–8. Propiedades medias.
Tabla 4–9. Comprobación de cálculos.
Tabla 4–10. Comprobación de zona de rotura.

ÍNDICE DE FIGURAS

- Figura 1-1. Comparación en la curva de tracción.
- Figura 1-2. Porcentaje de material compuesto en aviones.
- Figura 1-3. Giro de ejes.
- Figura 1-4. Orientación de la fibra.
- Figura 1-5. Fibras a 0° y 90° .
- Figura 1-6. Deformada de la probeta.
- Figura 1-7. Definición geometría.
- Figura 2-1. Planificación del corte de las probetas.
- Figura 2-2. Corte del laminado.
- Figura 2-3. Colocación del corcho en la bolsa de vacío.
- Figura 2-4. Bolsa de vacío.
- Figura 2-5. Rectificación del laminado.
- Figura 2-6. Lijado del laminado.
- Figura 2-7. Secado en el horno.
- Figura 2-8. Colocación de los tacones.
- Figura 2-9. Segunda bolsa de vacío.
- Figura 2-10. Máquina de corte.
- Figura 2-11. Probetas de ratio 10.
- Figura 2-22. Probetas de ratio 15.
- Figura 2-33. Probetas de ratio 20.
- Figura 2-44. Comparación de los tres ratios.
- Figura 3-5. Distancia “d” a la mordaza.
- Figura 3-2. Mordazas y extensómetro.
- Figura 3-3. Curva de tracción probetas ratio 10.
- Figura 3-4. Curva de tracción probetas ratio 15.
- Figura 3-5. Curva de tracción probetas ratio 20.
- Figura 3-6. Curva de tracción de los diferentes ratios.
- Figura 3-7. Rotura probetas ratio 10.
- Figura 3-8. Rotura probetas ratio 15
- Figura 3-9. Rotura probetas ratio 20.
- Figura 3-10. Módulos de elasticidad.
- Figura 3-11. Curva de tracción probetas ratio 15 con $d=10\text{mm}$.
- Figura 3-12. Curva de tracción probetas ratio 15 con $d=20\text{mm}$.
- Figura 3-13. Curva de tracción probetas ratio 15 con diferentes “d”.

Figura 3-14. Rotura probetas ratio 15 $d=10\text{mm}$.

Figura 3-15. Rotura probetas ratio 15 $d=20\text{mm}$.

Figura 3-16. Mordazas con $d=10\text{mm}$.

Figura 4-1. Curvas τ - γ ratio 10.

Figura 4-2. Curvas τ - γ ratio 15.

Figura 4-3. Curvas τ - γ ratio 20.

Figura 4-4. Curvas τ - γ ratios 10, 15 y 20.

E_{11}	Módulo de Young según la dirección 1
E_{22}	Módulo de Young según la dirección 2
ν_{12}	Coefficiente de Poisson
σ_{UTS}	Tensión última de rotura
G_{12}	Rigidez a cizalladura o módulo de elasticidad tangencial
θ	Ángulo de inclinación de la fibra
E_x	Módulo de Young con fibra orientada
γ_{12}	Deformación tangencial
σ_{12}	Tensión tangencial (también denominada τ_{12})
d	Distancia entre comienzo de tacón y mordaza
CMC	Material compuesto de matriz cerámica
MMC	Material compuesto de matriz metálica
PMC	Material compuesto de matriz polimérica

1 INTRODUCCIÓN Y ANTECEDENTES

1.1 Introducción

Se suele definir el material compuesto como la combinación a escala macroscópica de dos o más materiales con interfaces de separación entre ellos para formar un nuevo material [1].

Esta combinación tiene como objetivo tanto el obtener propiedades que no pueden ser alcanzadas por ninguno de ellos por separado, así como unir propiedades individuales en un único material.

Los materiales compuestos pueden ser clasificados según una serie de criterios, como pueden ser su constitución (matriz y refuerzo), según las direcciones del refuerzo, el número de capas... Usualmente, se suelen componer de un cierto número de capas y, dependiendo de las propiedades necesarias del producto final, se pueden colocar en direcciones preferentes con el fin de optimizar el diseño, lo que supone un ahorro tanto de material, como peso del componente.

Las fibras más utilizadas son la fibra de carbono, la fibra de vidrio y las orgánicas (Kevlar). Evidentemente, cada una presenta una serie de ventajas e inconvenientes que, según los requerimientos, determinarán la elección de una de ellas para una determinada aplicación. Pero en general, con el fin de dar unas propiedades de forma cualitativa, las fibras orgánicas son las más resistentes, las de carbono son las más rígidas y las de vidrio tienen menores propiedades tanto de resistencia como de rigidez, sin embargo, el precio se reduce en comparación con las otras. A continuación, se muestra una tabla comparativa de diversos materiales para tener un orden de las propiedades que pueden llegar a obtenerse.

Tabla 1–1. Propiedades de ciertos materiales

Material	Módulo de Young E (GPa)	Resistencia a la tracción σ_{UTS} (GPa)	Densidad $\rho \left(\frac{kg}{m^3} \right)$	Resistencia específica σ_{UTS}/ρ	Módulo específico E/ρ
Acero	210	0.34-2.1	7.8	0.043-0.27	26.9
Aluminio Aleado	70	0.14-0.62	2.7	0.052-0.23	25.9
Fibras					
Kevlar-49	130	2.8	1.5	1.87	87
Grafito (Módulo alto)	390	2.1	1.9	1.1	205
Vidrio-E	72.4	2.1	2.54	0.826	28.5
Vidrio-S	85.5	2.1	2.48	0.846	34.5

Como podemos observar, las fibras tienen una mayor resistencia específica y un mayor módulo específico, sin embargo, por sí solas no pueden utilizarse, debido a la necesidad de cohesión del material. Por tanto, es necesario combinarlas, por ejemplo, con resina para formar el material compuesto en sí, produciendo, por tanto, una disminución de ambas propiedades, como se puede observar en la figura 1-1. A continuación, mostramos una tabla comparativa de las matrices que suelen utilizarse.

Tabla 1-2. Propiedades de matrices

Propiedad	Resinas epoxy	Resinas poliéster
Densidad (kg/m^3)	210	0.34-2.1
Módulo de Young (GPa)	70	0.14-0.62
Resistencia a la tracción (MPa)		
Coefficiente de Poisson (-)	130	2.8
Absorción de agua (%)	390	2.1

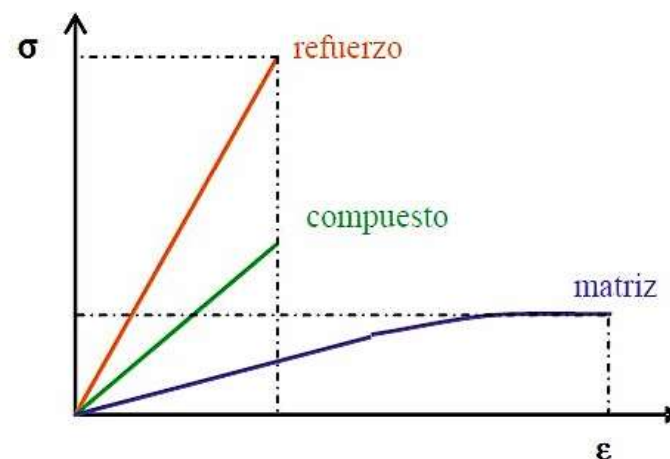


Figura 1-1. Comparación en la curva de tracción.

Debido a estas buenas propiedades, su uso en la industria está siendo incrementado. Además, se pueden diseñar piezas específicas para una determinada aplicación, favoreciendo aún más la utilización de estos materiales, por ejemplo, en la industria aeroespacial es necesario reducir al mínimo el peso estructural de las aeronaves.

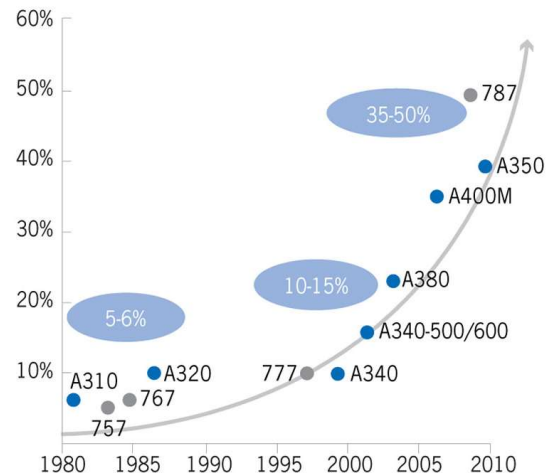


Figura 1-2. Porcentaje de material compuesto en aviones.

Aquí se muestra el crecimiento del uso de material compuesto en las aeronaves de las compañías de Airbus y Boeing a lo largo de los años. Se puede observar que, desde los primeros usos de estos materiales, se ha multiplicado por 10 el porcentaje de uso de los mismos, lo cual supone la parte mayoritaria.

Sin embargo, en la industria no solo se utilizan materiales compuestos de matriz polimérica (PMC), sino que también son utilizados los MMC y los CMC. Si es cierto que son utilizados en menor medida, debido a la mayor complejidad de fabricación y a su alto coste.

1.2 Antecedentes

Nosotros solo nos vamos a centrar en la fabricación de probetas con la fibra orientada a 10° con respecto a la dirección de aplicación de la carga. Por ello, tal y como vamos a ver a continuación, serán necesarios un cierto número de parámetros que ya han sido obtenidos previamente (otros compañeros) para el mismo material que vamos a fabricar. El material a utilizar es el AS4-8552, donde AS4 se refiere al tipo de fibra y el 8552 al tipo de resina epoxy. Las propiedades del material pueden ser encontradas en la hoja de datos del producto de Hexcel [2], sin embargo, muchas de ellas se han seleccionado de ensayos realizados por alumnos del departamento. En ella, se especifica que el curado del material debe realizarse a 180° C durante un tiempo aproximado de 120 minutos (Con un error de 5 minutos).

Lo primero será definir la ley de comportamiento elástico y lineal

$$\sigma_{ij} = C_{ijkl} \varepsilon_{kl}$$

Teniendo en cuenta que σ_{ij} y ε_{ij} (tensores de tensión y deformación) son simétricos, la ley de comportamiento se puede reducir a

$$\sigma_i = C_{ij} \varepsilon_j$$

Donde C_{ij} también es simétrico.

En el caso en el que nos encontramos, nuestro material es ortótropo, es decir, es un tipo de material anisótropo, y sus propiedades dependen de la dirección en la que se midan. Si invertimos la matriz C_{ij} , obtenemos la matriz que relaciona las deformaciones con las tensiones, denominándose S_{ij} , de tal forma que:

$$\begin{bmatrix} \varepsilon_{11} \\ \varepsilon_{22} \\ \varepsilon_{33} \\ \gamma_{23} \\ \gamma_{13} \\ \gamma_{12} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{1}{E_{11}} & \frac{-\nu_{21}}{E_{22}} & \frac{-\nu_{31}}{E_{33}} & & & \\ \frac{-\nu_{12}}{E_{11}} & \frac{1}{E_{22}} & \frac{-\nu_{32}}{E_{33}} & & & \\ \frac{-\nu_{13}}{E_{11}} & \frac{-\nu_{23}}{E_{22}} & \frac{1}{E_{33}} & & & \\ & & & \frac{1}{G_{23}} & & \\ 0 & & & & \frac{1}{G_{31}} & \\ & & & & & \frac{1}{G_{12}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \sigma_{11} \\ \sigma_{22} \\ \sigma_{33} \\ \sigma_{23} \\ \sigma_{13} \\ \sigma_{12} \end{bmatrix}$$

Podemos observar que las tensiones normales y las deformaciones tangenciales no están acopladas, del mismo modo que ocurre entre tensiones tangenciales y deformaciones normales.

Si suponemos que nos encontramos bajo el estado de tensión plana, éste viene caracterizado por:

$$\sigma_{13} = 0; \quad \sigma_{23} = 0; \quad \sigma_{33} = 0$$

De donde se obtiene que:

$$\gamma_{13} = 0; \quad \gamma_{23} = 0; \quad \varepsilon_{33} = \frac{-\nu_{13}}{E_{11}} \sigma_{11} + \frac{-\nu_{23}}{E_{22}} \sigma_{22}$$

Por tanto, la relación deformación-tensión queda simplificada a la siguiente:

$$\begin{bmatrix} \varepsilon_{11} \\ \varepsilon_{22} \\ \gamma_{12} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} S_{11} & S_{12} & 0 \\ S_{12} & S_{22} & 0 \\ 0 & 0 & S_{66} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \sigma_{11} \\ \sigma_{22} \\ \sigma_{12} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{1}{E_{11}} & \frac{-\nu_{21}}{E_{22}} & 0 \\ \frac{-\nu_{12}}{E_{11}} & \frac{1}{E_{22}} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1}{G_{12}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \sigma_{11} \\ \sigma_{22} \\ \sigma_{12} \end{bmatrix}$$

Pero debido a que el laminado no se encuentra en ejes principales, es necesario realizar un giro:

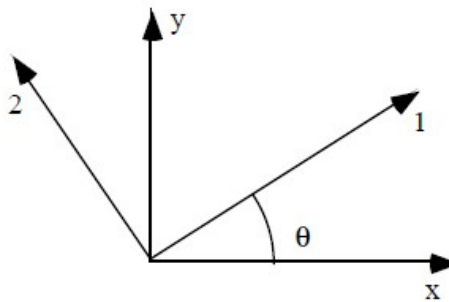


Figura 1-3. Giro de ejes.

De esta forma, podemos obtener la relación deformación-tensión en ejes no principales, de modo que:

$$\begin{bmatrix} \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \\ \gamma_{xy} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \overline{S_{11}} & \overline{S_{12}} & \overline{S_{16}} \\ \overline{S_{12}} & \overline{S_{22}} & \overline{S_{26}} \\ \overline{S_{16}} & \overline{S_{26}} & \overline{S_{66}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \sigma_{xy} \end{bmatrix}$$

$$\overline{S_{11}} = S_{11}\cos^4(\theta) + (2S_{12} + S_{66})\sin^2(\theta)\cos^2(\theta) + S_{22}\sin^4(\theta)$$

$$\overline{S_{12}} = (S_{11} + S_{22} - S_{66})\sin^2(\theta)\cos^2(\theta) + S_{12}(\sin^4(\theta) + \cos^4(\theta))$$

$$\overline{S_{22}} = S_{11}\sin^4(\theta) + (2S_{12} + S_{66})\sin^2(\theta)\cos^2(\theta) + S_{22}\cos^4(\theta)$$

$$\overline{S_{16}} = (2S_{11} - 2S_{22} - S_{66})\sin(\theta)\cos^3(\theta) + (2S_{11} - 2S_{22} + S_{66})\sin^3(\theta)\cos(\theta)$$

$$\overline{S_{26}} = (2S_{11} - 2S_{22} - S_{66})\sin^3(\theta)\cos(\theta) + (2S_{11} - 2S_{22} + S_{66})\sin(\theta)\cos^3(\theta)$$

$$\overline{S_{66}} = 2(2S_{11} + 2S_{22} - 4S_{12} - S_{66})\sin^2(\theta)\cos^2(\theta) + S_{66}(\sin^4(\theta) + \cos^4(\theta))$$

Existen diversos métodos para la determinación de la constante G_{12} . Los más usuales son los métodos indirectos, entre el que destaca el ensayo Off-Axis, aunque también puede obtenerse mediante ensayos sobre laminados equiangulares de $\pm 45^\circ$. En cuanto a los métodos directos, destacan el Rail Shear Test, los ensayos de cortadura sobre probetas de doble muesca y los ensayos de torsión sobre tubos.

Ensayo Off-Axis

En lo que respecta al ensayo Off-Axis, consiste en la caracterización a cizalladura de materiales compuestos, mediante la obtención de la tensión y la deformación en la dirección de aplicación de la carga, con fibras orientadas según una dirección.

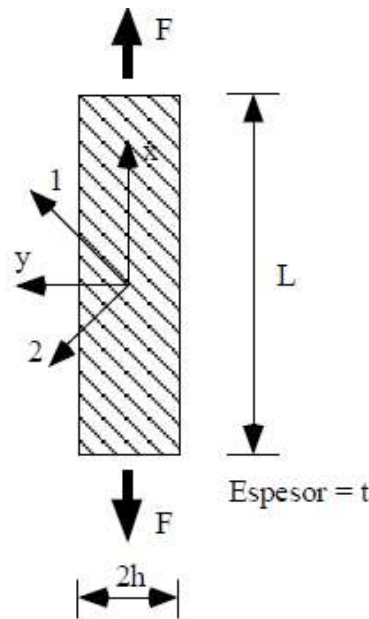


Figura 1-4. Orientación de la fibra.

Como podemos observar en la figura 1-4, el ángulo que forma la fibra se define por el ángulo que forma el eje 1 con el eje x, eje de aplicación de la carga. Para caracterizar el material, en primer lugar, se realizan ensayos con la fibra orientada a 0° y a 90° , tal y como se observa en la figura 1-5.

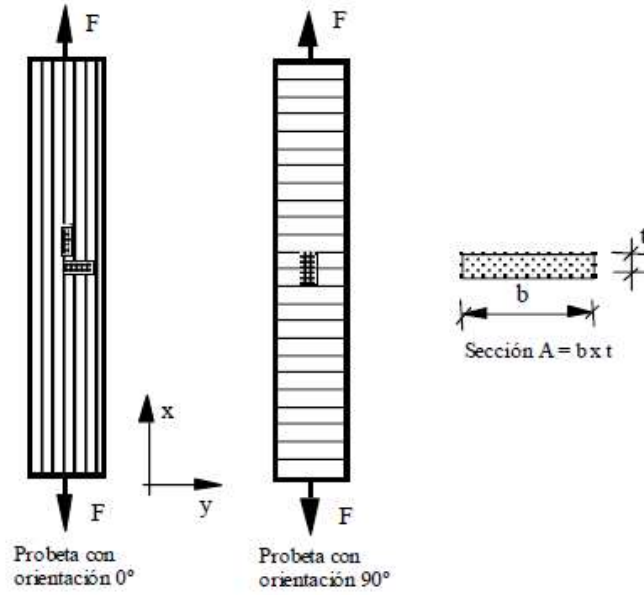


Figura 1-5. Fibras a 0° y 90°.

De estos ensayos podemos obtener las siguientes propiedades:

- E_{11} : Módulo de Young según la dirección 1 (con fibras a 0°).
- E_{22} : Módulo de Young según la dirección 2 (con fibras a 90°).
- ν_{12} : Coeficiente de Poisson (con fibras a 0° y banda extensométrica transversal).

La obtención de esas propiedades es relativamente sencilla, a que dividiendo la carga ($\sigma = F/A$) entre la deformación (ϵ) se obtiene directamente el módulo de Young para ambos casos. Luego el coeficiente de Poisson se obtiene sin más que dividir la deformación transversal (estrechamiento) por la deformación longitudinal (alargamiento) ($\nu_{12} = -\epsilon_y/\epsilon_x$).

En concreto, estos parámetros ya están caracterizados para nuestro material y tienen un valor de:

$$E_{11} = 125 \text{ GPa}; \quad E_{22} = 8.11 \text{ GPa}; \quad \nu_{12} = 0.34;$$

Entonces, a partir de estos datos, tenemos que obtener la rigidez a cizalladura, de la forma que se presenta. Del ensayo de tracción, podemos obtener el módulo de Young en la dirección de aplicación de la carga (ver figura 1-3), de tal forma que calcularíamos $E_x = F/(A \epsilon_x)$ y conociendo la orientación de la fibra (10° en nuestro caso), solo tendríamos que aplicar la siguiente fórmula [1], obtenida de las constantes anteriores:

$$\overline{S_{11}} = \frac{1}{E_{11}} \cos^4(\theta) + \left(2 \frac{-\nu_{21}}{E_{22}} + \frac{1}{G_{12}} \right) \sin^2(\theta) \cos^2(\theta) + \frac{1}{E_{22}} \sin^4(\theta) = \frac{1}{E_x} \quad (1.1)$$

$$G_{12} = - \frac{\cos^2 \theta \sin^2 \theta}{\frac{1}{E_{11}} \cos^4 \theta - \frac{1}{E_x} - \frac{2 \nu_{12}}{E_{11}} \cos^2 \theta \sin^2 \theta + \frac{1}{E_{22}} \sin^4 \theta} \quad (1.2)$$

Sin embargo, debido al acoplamiento de tensiones normales y tangenciales, se originan deformaciones tangenciales, lo que presenta diversos problemas.

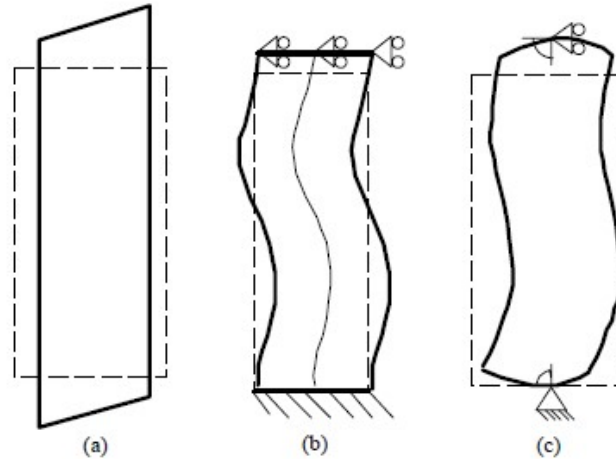


Figura 1-6. Deformada de la probeta.

En la figura 1-6 (a), se muestra la deformada ideal del ensayo. Lo que sucede realmente, debido a las condiciones de restricción de los desplazamientos, es que aparecen tensiones tangenciales y normales acopladas, por lo que realmente la deformada se parece más a la figura 1-6 (c). Por ello, se va a realizar un estudio aumentando el ratio de las probetas, con el fin de acercar la deformada real a la ideal, al menos en la zona central.

1.3 Objetivos

Para el ensayo de tracción “Off-Axis” a 10° , se pretende estudiar la variación de la resistencia de las probetas en función del ratio (relación entre longitud y ancho). Además, también se pretende estimar la variación en función de la zona en la que se aprietan las mordazas. A partir de la resistencia a la tracción (σ_{UTS}) y la deformación en la rotura, obtendremos el módulo de Young (E_x) y a partir de ella, obtendremos la rigidez a cizalladura (G_{12}). La obtención de los parámetros se detallará en el apartado de ensayos y resultados.

1.4 Contenido

En primer lugar, se ha detallado el procedimiento para la obtención de la rigidez a cizalladura, lo cual se ha realizado en el apartado anterior. Una vez hecho esto, explicaremos el proceso de fabricación de los especímenes llevado a cabo.

Posteriormente, una vez realizado los ensayos, procederemos a la obtención de las propiedades de interés. Para ello, a partir de las curvas tensión-deformación obtenidas en la máquina de ensayos, las introduciremos en el software Matlab y se analizarán dichas curvas. Por último, se desarrollarán las conclusiones que se hayan ido obteniendo a lo largo del desarrollo del trabajo.

1.5 Definición de la geometría

Para el resto del trabajo, vamos a identificar los parámetros que definen la geometría de las probetas.

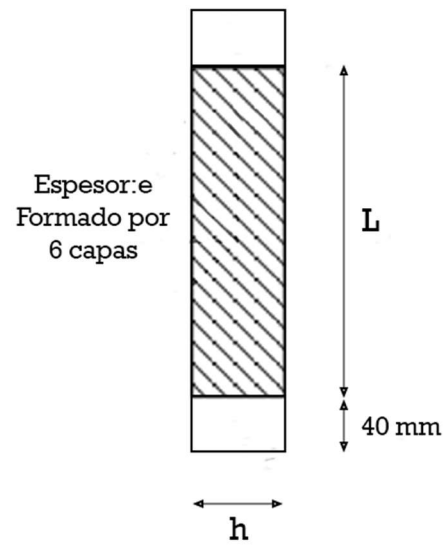


Figura 1-7. Definición geometría.

Los tacones van a quedar fijados a 40 mm, lo único que vamos a variar va a ser el ratio de las probetas:

$$R = \frac{L}{h}$$

Como queda definido en la figura 1-7, las probetas estarán formadas por seis capas de material.

2 FABRICACIÓN DE LOS ESPECÍMENES

2.1 Introducción

La fabricación de materiales compuestos se divide en dos partes, el laminado y el curado. En lo que respecta al laminado, existen diversos métodos. Entre los más comunes (con molde abierto) se encuentran:

-Apilado manual: la matriz de resina es aplicada manualmente sobre las fibras dispuestas en un molde con la forma a fabricar.

-Enrollado de filamentos: el cual consiste en pasar una serie de hilos a través de un baño de resina y enrollarlas en un molde giratorio.

-Bolsa de vacío, presión y autoclave: este proceso es el que se va a llevar a cabo en este proyecto. Consiste en la utilización de pre-pregs, formados por fibras unidireccionales y por la matriz de resina, de tal forma que, apilando varias capas de éstos, y tras su curado, obtenemos el material compuesto.

-Proyección: consiste en la disposición de fibras pequeñas y resina sobre el molde, de tal forma que no se tiene una orientación preferente de las fibras.

Para la caracterización del material es necesario fabricar las probetas para luego realizar los ensayos pertinentes. En nuestro caso, fabricaremos probetas de un ancho de 15 mm, de tres ratios diferentes, en concreto, ratios de 10, 15 y 20, todas ellas con la fibra a 10° . Además, realizaremos un estudio en las probetas de ratio 15 para observar si existe alguna variación de las propiedades dependiendo de donde se agarre la probeta en la mordaza, que explicaremos posteriormente con más detalle.

2.2 Corte, apilado y curado

Antes de empezar a cortar las capas del laminado de fibra de carbono, se ha realizado un pequeño estudio, con el fin de desperdiciar la menor cantidad de material posible. Principalmente, el laminado estaba delimitado en su ancho, siendo igual a 1200 mm, del cual hay que dejar un margen de unos 10 mm de los bordes del mismo. Por tanto, se decidió realizarlo tal y como vemos en la figura 2-1 (los colores indican los tres ratios diferentes).

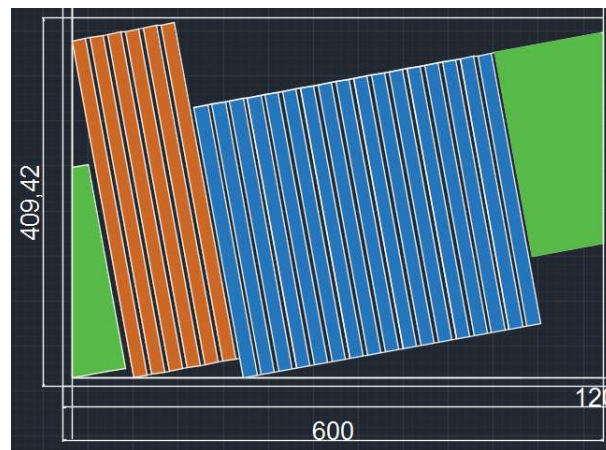


Figura 2-1. Planificación del corte de las probetas.

Para evitar la degradación del material y conservarlo en buenas condiciones, es necesario mantenerlo guardado en una bolsa de polietileno dentro de un congelador. Cuando vayamos a utilizarlo de nuevo, es necesario sacarlo del congelador y mantenerlo en una sala acondicionada, para que no se superen los 21-22 °C. Una vez se temple el laminado, se procede a cortar las diferentes capas siguiendo el patrón definido anteriormente. Para el corte de las mismas, se utiliza un cúter y para las medidas una regla y transportador de ángulos. El material se corta sobre un cristal, así se evita que se pegue a la mesa y además, el cúter no lo deteriora.

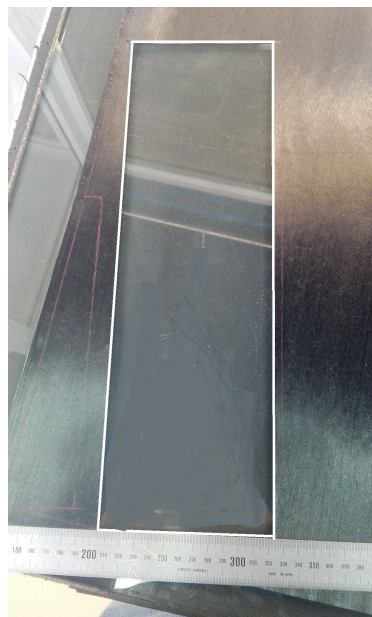


Figura 2-2. Corte del laminado.

Una vez cortadas todas las capas, se procede al apilado de las mismas, para ello, se colocan de una en una, uniéndolas con una espátula. En nuestro caso, ya que son solo 6 capas, solo es necesario pasarlas una vez por la bolsa de vacío para compactar todas las capas. Ésta está compuesta por una capa de teflón para evitar que se pegue el laminado, otra igual, pero en este caso por encima, una capa de tejido aireador, para repartir uniformemente el vacío y por último una capa de plástico para cubrirlo todo. En ésta última, se colocan dos tomas de aire y se fija con cromato a una tabla de madera.

Una vez compactado todo, se procede a realizar de igual forma otra bolsa de vacío, pero en este caso va a ser introducida en el autoclave durante 2 horas para el curado. Lo único que cambia, es que es necesario incluir unas

tiras de corcho para evitar que la resina se salga. Además, no se fija a una tabla de madera, sino a una plancha de acero, ya que va a estar sometida a gran temperatura.

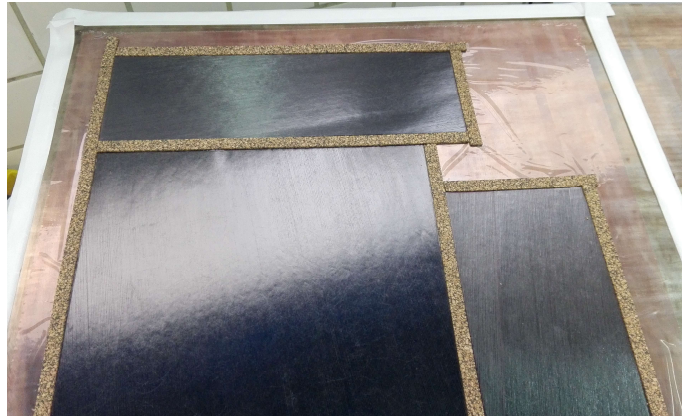


Figura 2-3. Colocación del corcho en la bolsa de vacío.

Cuando esté todo colocado, es necesario aplicar mediante una bomba, el vacío en la bolsa.

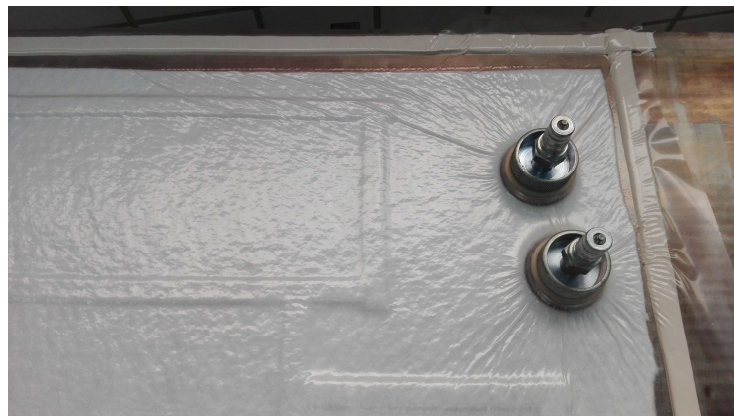


Figura 2-4. Bolsa de vacío.

El ciclo de curado dura aproximadamente 2 horas, a temperatura y presión constantes. Una vez curadas y atemperadas, se procede a la eliminación del corcho y a la rectificación de las probetas.

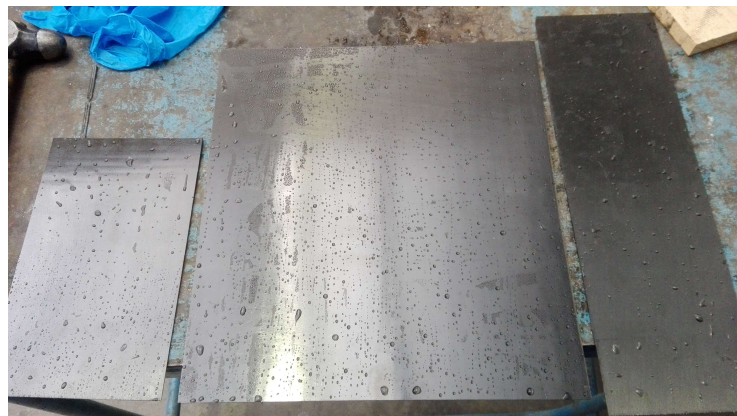


Figura 2-5. Rectificación del laminado.

2.3 Colocación de los tacones

Para la colocación de los tacones de fibra de vidrio es necesario lijar la superficie en la que van a ser colocados. Para ello, delimitamos según la longitud libre (la que va a quedar entre ambos tacones), los marcamos y lijamos con sumo cuidado. Para ayudarnos en este trabajo y evitar que sobrepasemos el límite, se puede colocar una cinta adhesiva de lado a lado del laminado.



Figura 2-6. Lijado del laminado.

Este proceso habrá que realizarlo tanto por la parte inferior como por la superior, por ambas caras del laminado, permitiendo así que se adhiera correctamente el adhesivo junto con los tacones.

Los tacones de fibra de vidrio también deben ser cortados a la medida necesaria (40 mm), siempre dejando un margen que luego podrá corregirse con un segundo rectificado. Una vez cortados, se procede a limpiarlos con agua y secarlos en un horno a una temperatura de unos 70 °C, tal y como se muestra en la figura 2-7. Posteriormente, se limpian las zonas en las que se va a colocar el adhesivo con acetona, permientiando así, una mayor adherencia.



Figura 2-7. Secado en el horno.

El adhesivo a utilizar es en caliente (es decir, que será introducido en el autoclave). Para ello, se corta a la medida de los tacones y se rebaja un poco los bordes para evitar que se esparza por la bolsa. Además, hay que colocar una cinta para evitar que la resina que sobresalga se adhiera a la parte interior de la probeta.

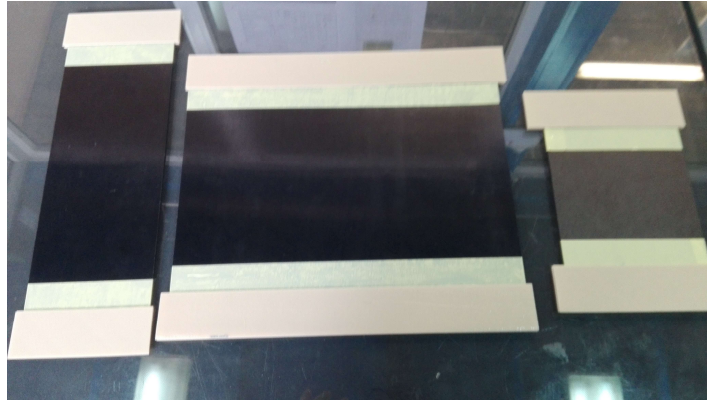


Figura 2-8. Colocación de los tacones.

Una vez colocado, se procede a realizar la bolsa de vacío, de igual forma que se hizo anteriormente. Sin embargo, debido a que el laminado ya está curado, no es necesario utilizar la plancha de acero, la cual se ha sustituido por una bolsa que recubre completamente las zonas superior e inferior, tal y como se muestra en la figura 2-9.

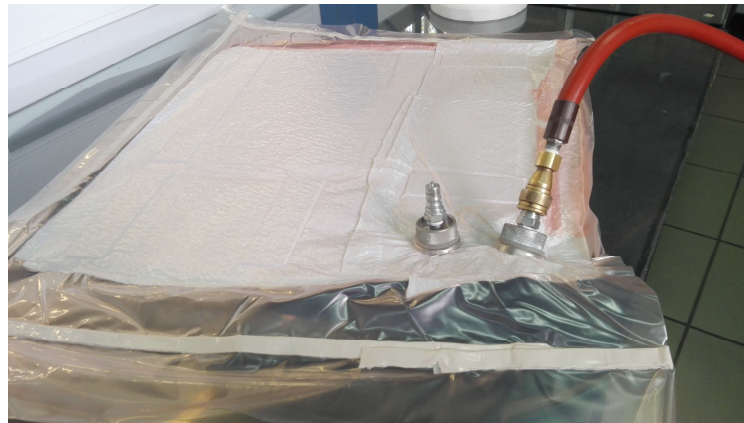


Figura 2-9. Segunda bolsa de vacío.

2.3 Corte de las probetas

El corte se realizará mediante un disco de abrasión. El ancho de la probeta está ajustado mediante un calibre o pie de rey en la propia máquina. Es importante destacar, que debe estar lubricada todo el tiempo (agua).



Figura 2-10. Máquina de corte.

Debido a que todas tienen un ancho de 15 mm, solo será necesario ser ajustada una vez, aunque siempre hay que ir comprobando que el ancho está dentro de un rango para dar por válida la probeta (± 0.5 mm).

A continuación se muestran las probetas ya cortadas, a las que se les ha quitado también la cinta que protege la parte interior de las probetas.

Cabe destacar, que se han podido obtener 6 probetas para cada conjunto, excepto en el caso de las de ratio 10, que se ha obtenido un total de 7 probetas.

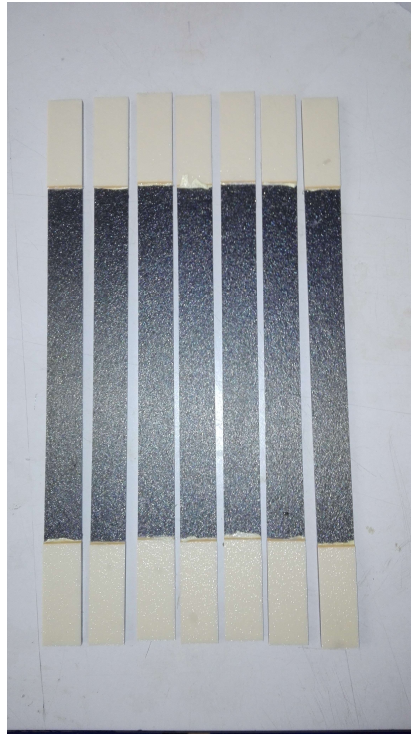


Figura 2-21. Probetas de ratio 10.

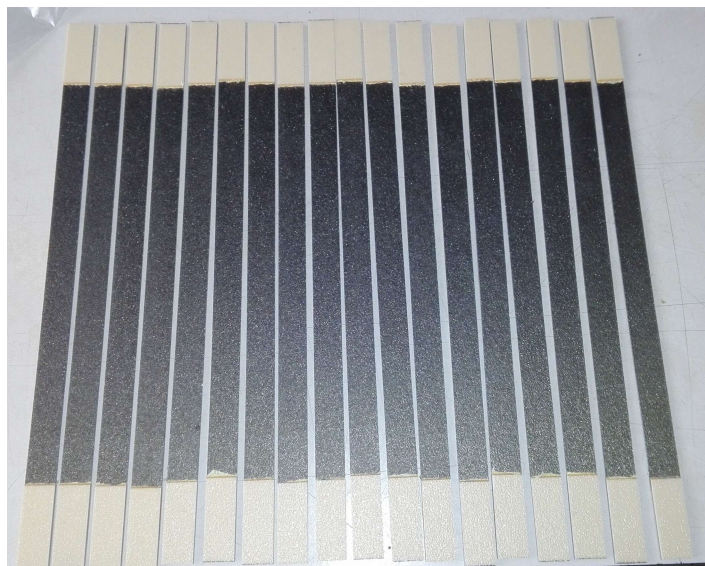


Figura 2-32. Probetas de ratio 15.



Figura 2-43. Probetas de ratio 20.



Figura 2-54. Comparación de los tres ratios.

Terminado el proceso de fabricación, se procede a explicar los ensayos que han sido llevados a cabo.

3 ENSAYOS Y RESULTADOS

3.1 Introducción

El ensayo llevado a cabo ha sido el de tracción. Antes de realizar directamente los ensayos, se realizaron las medidas pertinentes para caracterizar la sección de las probetas. Para ello, se midió el espesor en cinco puntos distintos utilizando un micrómetro y también el ancho de los especímenes mediante un calibre. La nomenclatura utilizada es la siguiente:

- R10-[]: Designa las probetas de ratio 10.
- R20-[]: Designa las probetas de ratio 20.
- R151-[]: Designa las probetas de ratio 15.
- R152-[]: Designa las probetas de ratio 15 con agarre a una distancia $d=10\text{mm}$.
- R153-[]: Designa las probetas de ratio 15 con agarre a una distancia $d=20\text{mm}$.

Tal y como se muestra en la figura 3-1, la distancia “d” es la que se indica:

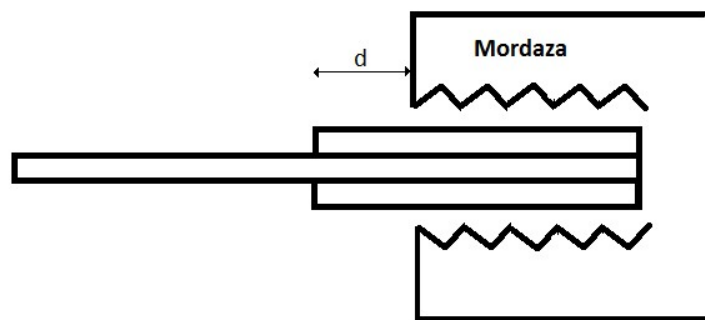


Figura 3-1. Distancia “d” a la mordaza.

3.2 Variación con el ratio del especimen

En primer lugar, se mostrarán los resultados obtenidos de los ensayos de las probetas de ratio 10, 15 y 20. En cuanto a las medidas de ancho y espesor medio, son las siguientes:

Tabla 3-1. Dimensiones de las probetas

Identificación	Ancho medio (mm)	Espesor medio (mm)	Ratio
R10-1	14,96	1,1978	10
R10-2	14,87	1,1868	10
R10-3	14,91	1,18	10
R10-4	14,868	1,1898	10
R10-5 ¹	14,46	1,1716	10
R10-6	14,986	1,1948	10
R10-7	14,956	1,206	10
R151-1	15,088	1,1776	15
R151-2	15,07	1,178	15
R151-3	15,064	1,1754	15
R151-4	15,108	1,1858	15
R151-5	15,114	1,1906	15
R151-6	15,146	1,1768	15
R20-1	15,076	1,1608	20
R20-2	15,086	1,2218	20
R20-3	15,126	1,2018	20
R20-4	15,222	1,1922	20
R20-5	14,836	1,1948	20
R20-6	15,124	1,201	20

Cabe destacar, que, al tener ratios grandes, las fibras de las probetas no llegan de tacón a tacón, por lo tanto, la rotura se realizará por un punto arbitrario siguiendo la dirección de la fibra. Una vez realizadas las medidas, se procede al ensayo de las probetas. Para ello, se aprietan las mordazas y se coloca el extensómetro centrado en la probeta, tal y como se puede apreciar en la figura 3-2.

¹ En color rojo se muestran las probetas que se rechazan por tener una discrepancia en el ancho superior a 0.5mm



Figura 3-2. Mordazas y extensómetro.

La longitud inicial del extensómetro (l_0) es de 50 mm, parámetro que será necesario para calcular posteriormente la deformación. Una vez colocada, se procede al ensayo en sí. Para ello, en el software instalado en el ordenador, reiniciamos los valores del extensómetro y reinicializamos la ventana gráfica para obtener una curva carga-apertura del extensómetro correctamente centrada en el gráfico.

Del software obtenemos esencialmente tres columnas de datos.

- Carga (N) a lo largo del ensayo.
- Apertura del extensómetro (Δl mm).
- Desplazamiento de la cruceta (mm), la cual almacena el desplazamiento de la mordaza.

A partir de estos datos, podemos obtener la curva tensión-deformación, de la siguiente forma.

$$\sigma = \frac{F}{A}; \quad \varepsilon = \frac{\Delta l}{l_0};$$

A continuación, se muestran las curvas tensión-deformación obtenidas para los diferentes especímenes, así como una gráfica conjunta en la que se pueden apreciar los tres ratios. Los ensayos que han salido de manera defectuosa, no se han incluido en las curvas tensión-deformación.

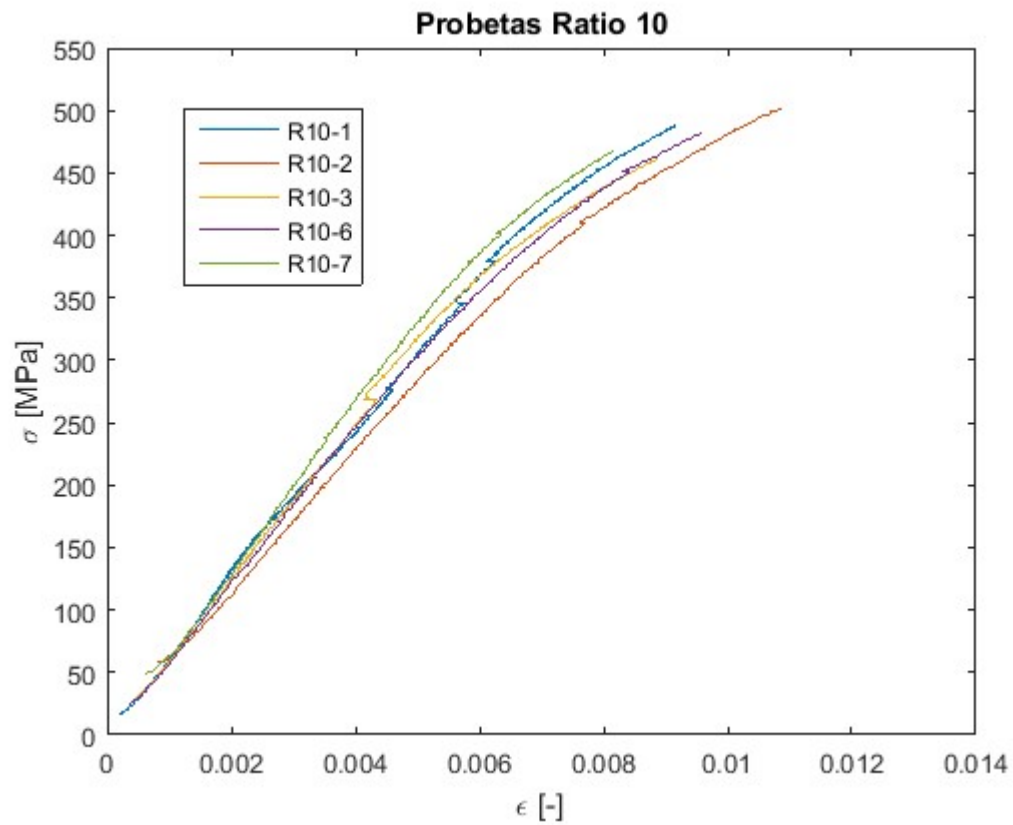


Figura 3-3. Curva de tracción probetas ratio 10.

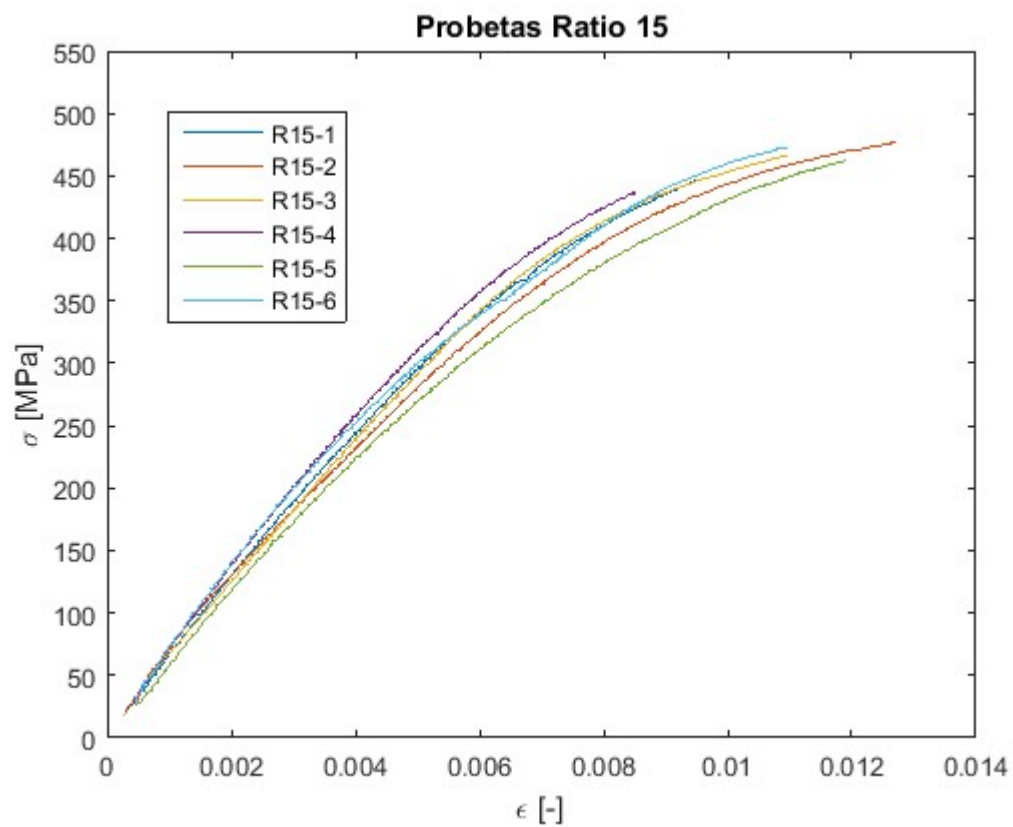


Figura 3-4. Curva de tracción probetas ratio 15.

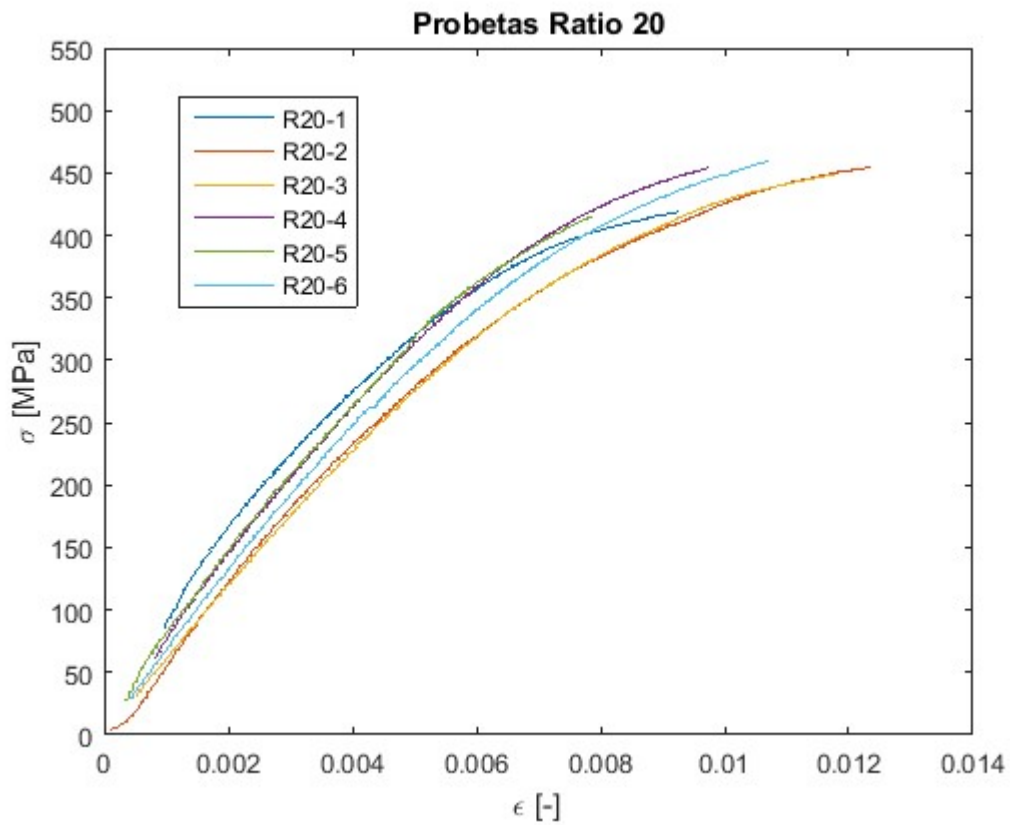


Figura 3-5. Curva de tracción probetas ratio 20.

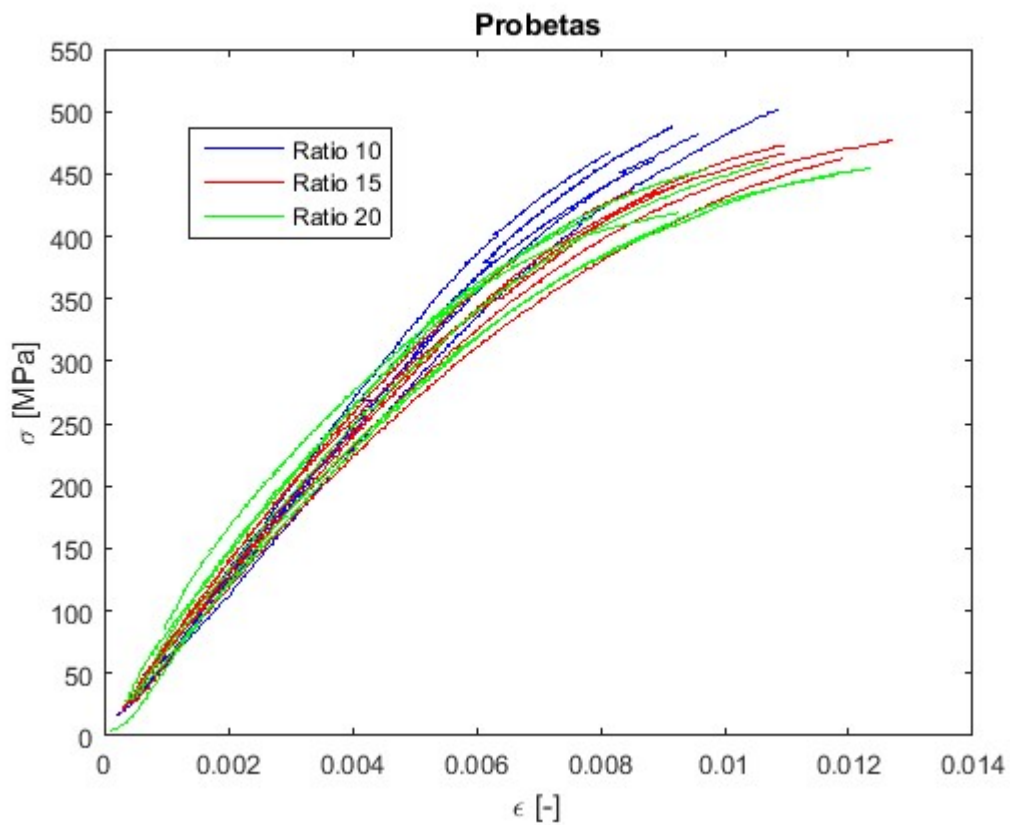


Figura 3-6. Curva de tracción de los diferentes ratios.

Incluimos además, las probetas una vez ensayadas para ver por donde se produce la rotura de las mismas.

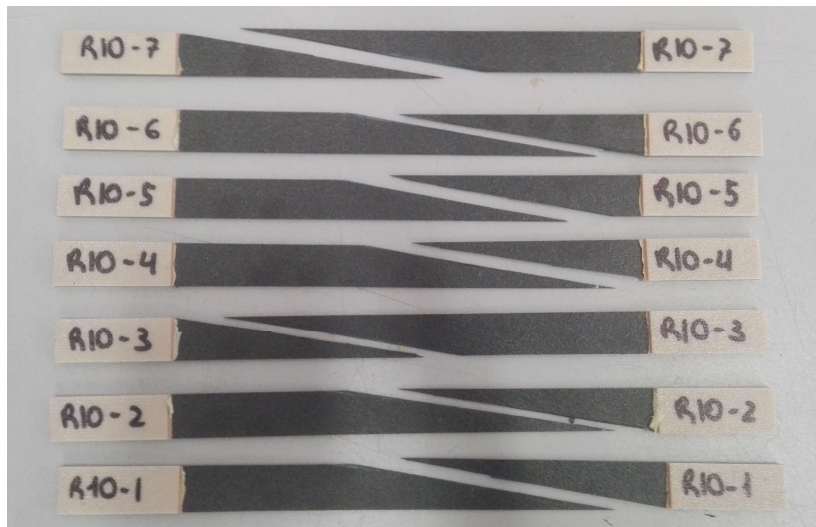


Figura 3-7. Rotura probetas ratio 10.

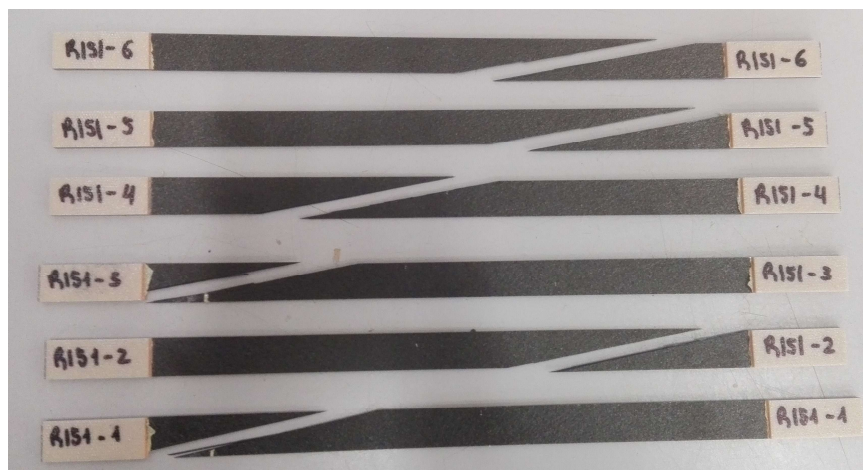


Figura 3-8. Rotura probetas ratio 15



Figura 3-9. Rotura probetas ratio 20.

Una vez realizados los ensayos, es hora de obtener los resultados que queremos caracterizar. Vamos a tener en cuenta todas las probetas e indicaremos, al igual que se hizo en la tabla anterior, las que se han descartado, ya sea por defectos geométricos, como si se trata de algún error en el ensayo.

Realizaremos los cálculos basándonos tanto en el módulo de Young inicial (tangente), como el que se obtiene al unir los puntos inicial y final en las curvas de tensión-deformación, tal y como se muestra a continuación, en la figura 3-10.

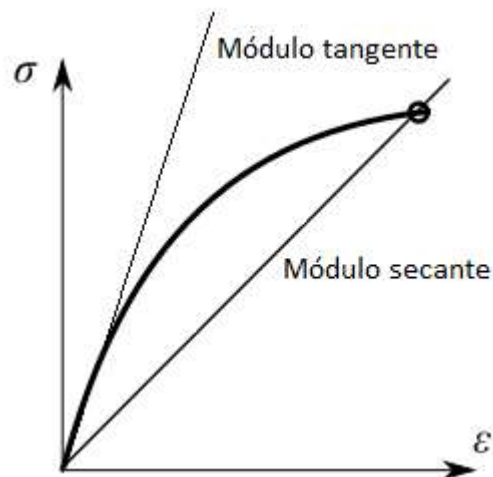


Figura 3-10. Módulos de elasticidad.

Tabla 3-2. Resultados de los ensayos, E_x y G_{12} tangentes.

Identificación	Carga de rotura (N)	Tensión de rotura (MPa)	Deformación (-)	E_x (GPa)	G_{12} (GPa)
R10-1	8741,69	487,6	0,009162	64,332	3,625
R10-2	8852,54	501,6	0,01087	67,642	4,003
R10-3	8121,7	461,6	0,008885	68,192	4,069
R10-4	9267,51	523,9	0,01245	57,677	2,966
R10-5	7778,35	459,1	0,01184	60,55	3,236
R10-6	8622,99	481,6	0,009581	66,176	3,831
R10-7	8429,73	467,4	0,008171	77,544	5,398
R151-1	7936,29	446,7	0,00952	65,856	3,795
R151-2	8472,9	477,3	0,01274	59,757	3,159
R151-3	8263,94	466,7	0,01099	62,06	3,386
R151-4	7829,36	437	0,008519	68,821	4,147
R151-5	8311,03	461,9	0,01189	56,407	2,853
R151-6	8433,66	473,2	0,01099	63,119	3,4959
R20-1	7331,99	419	0,009267	85,157	6,857
R20-2	8374,8	454,4	0,01237	54,255	2,67
R20-3	8164,86	448,7	0,01178	58,911	3,079
R20-4	8240,4	454,1	0,009734	73,891	4,829
R20-5	7355,54	415	0,007866	72,07	4,571
R20-6	8351,25	459,6	0,01073	63,045	3,488

Sin embargo, el módulo de Young que se ha utilizado (E_x) es el correspondiente a la pendiente real de las curvas obtenidas de los ensayos. Calcularemos ahora, utilizando la pendiente de la recta secante.

Tabla 3–3. Módulos secantes E_x y G_{12} .

Identificación	E_x secante (GPa)	G_{12} (GPa)
R10-1	54,9	2,7237
R10-2	50,163	2,3476
R10-3	54,501	2,6903
R10-4	43,95	1,9145
R10-5	43,298	1,8725
R10-6	52,381	2,5182
R10-7	61,951	3,3754
R151-1	49,52	2,2998
R151-2	39,076	1,6145
R151-3	43,627	1,8936
R151-4	53,283	2,5903
R151-5	40,386	1,6921
R151-6	44,91	1,9775
R20-1	50,673	2,386
R20-2	36,952	1,4933
R20-3	39,882	1,662
R20-4	51,02	2,4124
R20-5	55,505	2,775
R20-6	44,777	1,9687

3.3 Variación con el agarre de la mordaza

Ahora nos centraremos en mostrar los resultados obtenidos para el caso en el que la cogida de las mordazas varía, tal y como se explicó con anterioridad. Cabe destacar, que los datos ya analizados en el apartado anterior para las probetas de ratio 15 con $d=0\text{mm}$, no se van a mostrar de nuevo, sino que se toman los ya proporcionados en el apartado anterior. Las medidas de las probetas se muestran a continuación:

Tabla 3–4. Dimensiones de las probetas

Identificación	Ancho medio (mm)	Espesor medio (mm)	Ratio
R152-1	15,14	1,1932	15
R152-2	15,07	1,1722	15
R152-3	15,092	1,1718	15
R152-4	15,016	1,191	15
R152-5	15,204	1,2034	15
R152-6	15,09	1,184	15
R153-1	15,102	1,1846	15
R153-2	15,086	1,192	15
R153-3	15,086	1,1944	15
R153-4	15,108	1,1798	15
R153-5	15,082	1,1726	15
R153-6	15,078	1,179	15

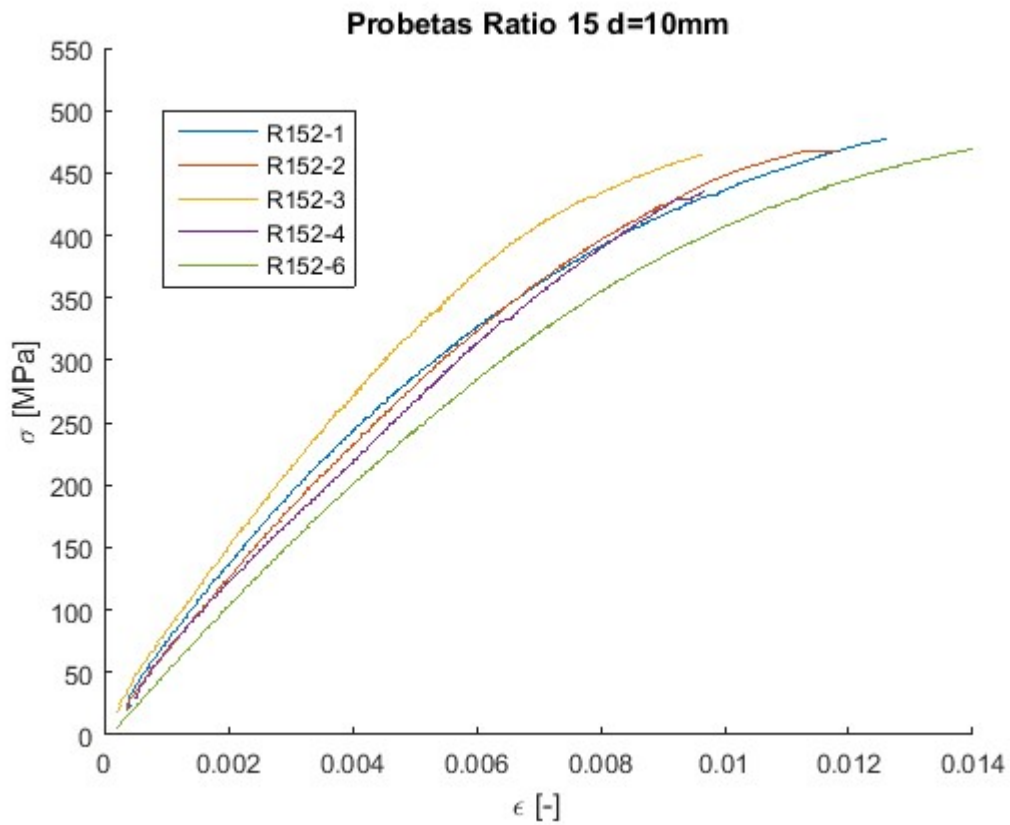


Figura 3-11. Curva de tracción probetas ratio 15 con d=10mm.

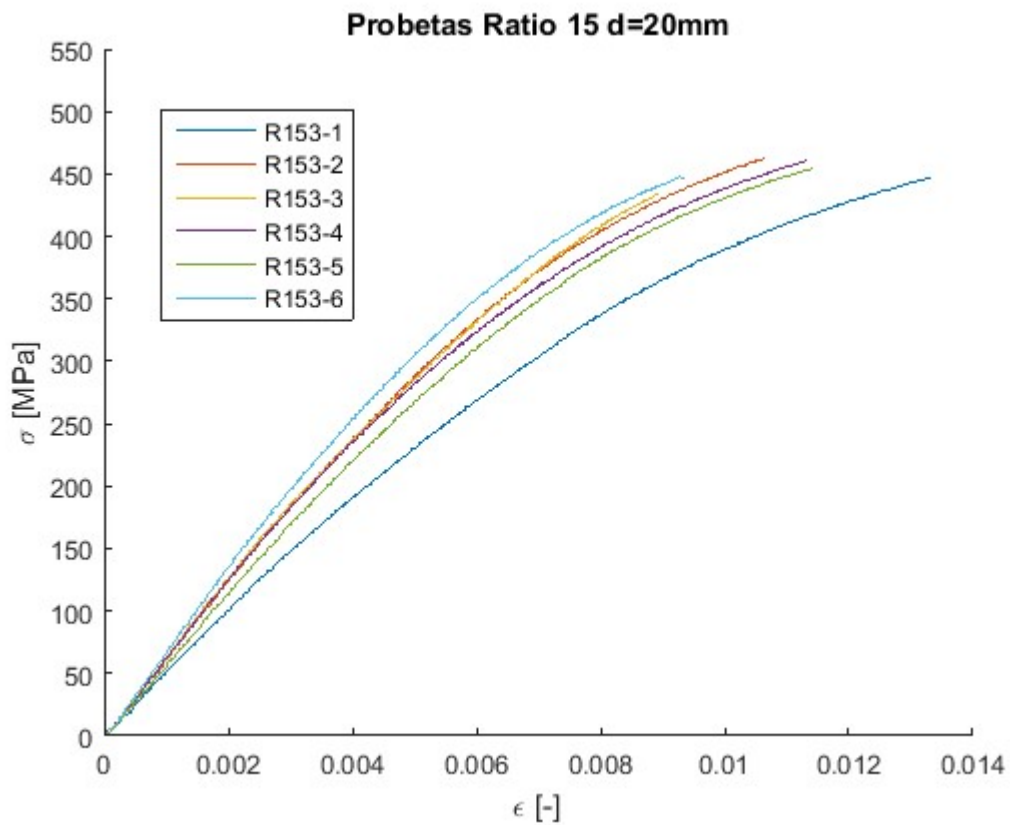


Figura 3-12. Curva de tracción probetas ratio 15 con d=20mm.

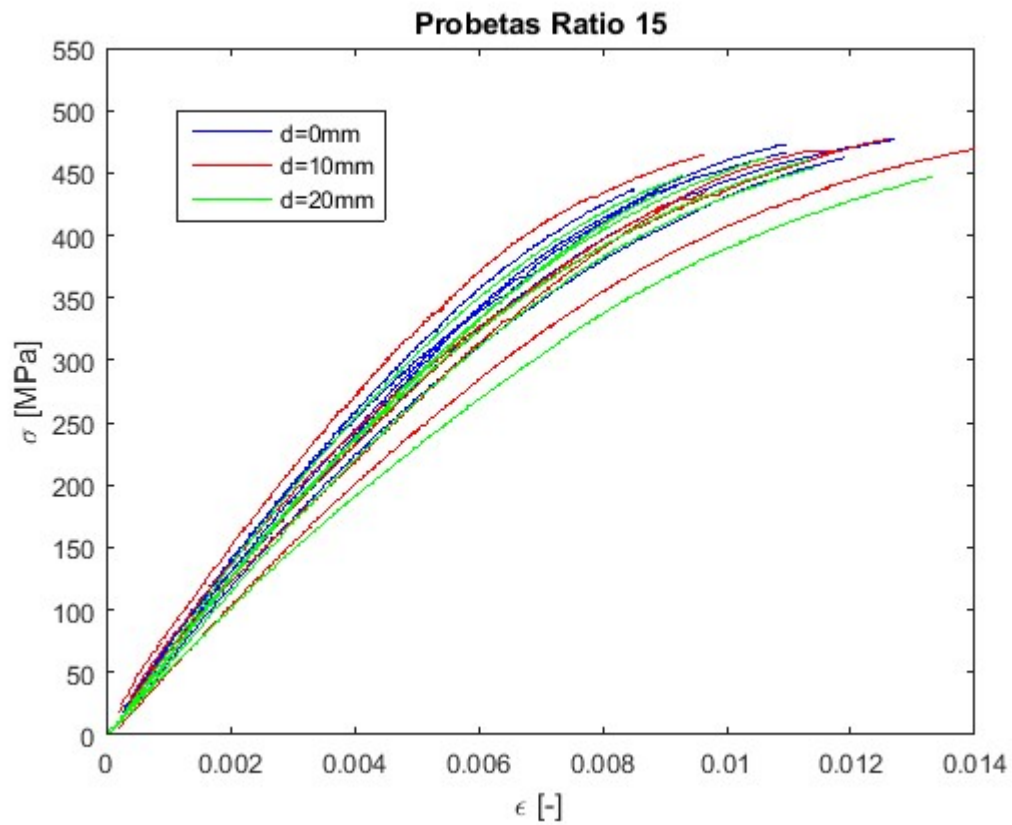


Figura 3-13. Curva de tracción probetas ratio 15 con diferentes “d”.

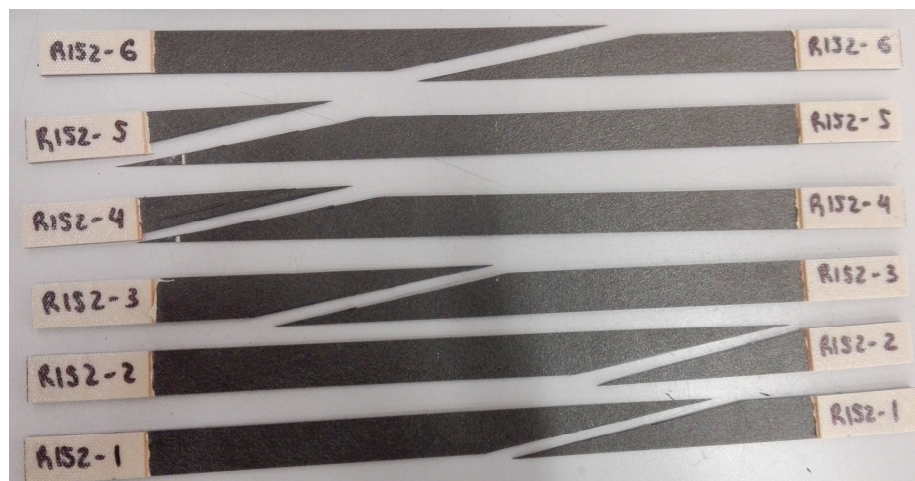


Figura 3-14. Rotura probetas ratio 15 d=10mm.

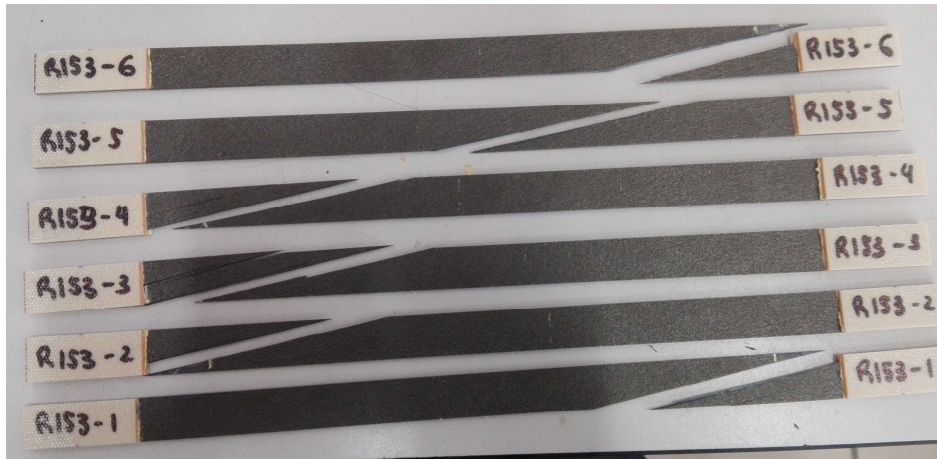


Figura 3-15. Rotura probetas ratio 15 $d=20\text{mm}$.



Figura 3-16. Mordazas con $d=10\text{mm}$.

Tabla 3–5. Resultados de los ensayos, E_x y G_{12} tangentes .

Identificación	Carga de rotura (N)	Tensión de rotura (MPa)	Deformación (-)	E_x (GPa)	G_{12} (GPa)
R152-1	8619,07	477,1	0,01262	58,3	3,023
R152-2	8252,17	467,1	0,0118	57,653	2,964
R152-3	8228,63	465,3	0,009661	70,758	4,394
R152-4	7794,04	435,8	0,009689	58,512	3,042
R152-5	7193,67	393,2	0,006018	70,483	4,358
R152-6	8437,58	472,3	0,01468	47,567	2,159
R153-1	8003	446,9	0,01331	45,212	1,9975
R153-2	8322,8	462,8	0,01065	58,378	3,03
R153-3	7833,29	434,7	0,008917	61,605	3,34
R153-4	8220,78	461,2	0,01134	56,319	2,8453
R153-5	8038,31	454,5	0,01143	53,093	2,575
R153-6	7959,83	447,8	0,009377	62,241	3,405

Tabla 3–6. Módulos secantes E_x y G_{12} .

Identificación	E_x secante (GPa)	G_{12} (GPa)
R152-1	38,973	1,6085
R152-2	40,799	1,717
R152-3	49,52	2,2998
R152-4	47,402	2,1474
R152-5	66,866	3,911
R152-6	32,426	1,2518
R153-1	34,009	1,3338
R153-2	43,87	1,9093
R153-3	50,527	2,375
R153-4	40,902	1,7232
R153-5	39,934	1,6651
R153-6	48,136	2,1994

4 ANÁLISIS

4.1 Introducción

En base a los resultados obtenidos, que se han mostrado en el capítulo anterior, se procederá a la comparación de los mismos en orden de extraer consecuencias, tanto sobre la influencia del ratio como sobre la influencia del agarre de la mordaza.

4.2 Variación con el ratio del especimen

Una vez obtenidos los valores de la rigidez a cizalladura, calcularemos la media para los diferentes tipos de probetas, separando también, los tres casos de cogida de la mordaza.

Tabla 4–1. Propiedades medias.

Identificación	Tensión de Rotura (MPa)	E_x tangente inicial (GPa)	G_{12} tangente inicial (GPa)	E_x secante (GPa)	G_{12} secante (GPa)
R10	480	68,78	4,185	54,78	2,731
R151	460	62,67	3,473	45,13	2,011
R20	442	67,89	4,249	46,47	2,116

Una buena comprobación de los cálculos, sería recalcular el módulo a cizalladura, pero en este caso, no de cada probeta por separado, sino a partir del módulo de Young medio de cada uno de los ratios. Como solo se trata de una comprobación, solo lo realizaremos con el módulo de Young tangente.

Tabla 4–2. Comprobación de cálculos.

Identificación	G_{12} tangente (GPa)	$\overline{G_{12}}$ tangente (GPa)	Error relativo (%)
R10	4,185	4,141	1,05
R151	3,473	3,449	0,69
R20	4,249	4,033	5,08

Podemos observar en la tabla 4-1, que el módulo de Young tangente en el caso de ratio 15 sufre un descenso con respecto al resto. Debido a ello se decidió comprobar el ángulo de las fibras para verificar si estaban colocadas a 10°. Mostramos, por tanto, una tabla con la orientación de las fibras para los diferentes ratios (cabe destacar que para el ratio 15, todas las probetas están sacadas del mismo laminado, es por ello, que no se han analizado para las probetas R152 y R153).

Tabla 4-3. Comprobación de ángulos.

Identificación	Ancho (mm)	Alto (mm)	Ángulo (°)
R10-1	14,85	89,60	9,41
R10-2	14,89	92,40	9,15
R10-3	14,82	88,60	9,50
R10-4	14,75	88,45	9,47
R10-5	14,30	81,96	9,90
R10-6	14,94	87,23	9,72
R10-7	14,88	88,96	9,50
R151-1	14,96	83,47	10,16
R151-2	15,07	83,00	10,29
R151-3	14,91	81,04	10,42
R151-4	15,00	83,67	10,16
R151-5	15,00	86,45	9,84
R151-6	14,98	85,25	9,97
R20-1	14,16	76,58	10,48
R20-2	15,09	84,97	10,07
R20-3	15,11	84,78	10,11
R20-4	15,03	81,68	10,43
R20-5	14,25	78,17	10,33
R20-6	15,13	83,56	10,26

Tabla 4-4. Ángulos medios.

Identificación	Ángulo medio (°)
R10	9,52
R151	10,14
R20	10,28

Podemos apreciar que existe una diferencia significativa en lo que respecta a la orientación de las fibras. En concreto, las probetas de ratio 10 tienen aproximadamente medio grado menos. Esto implica, que al tener un ángulo más cercano a 0°, la resistencia aumenta. Por otro lado, las de ratio 20 tienen un ángulo un poco mayor, lo que implica que la resistencia es menor que si tuviera 10°.

Por tanto, como apreciamos en la tabla inferior, la variación de la tensión de rotura con respecto al ratio, seguiría siendo la misma, pero el rango de valores estaría más cercano a las probetas de ratio 15, por lo que la dispersión no sería tan severa.

Tabla 4-5. Verificación de las propiedades.

Identificación	Tensión de Rotura (MPa)
R10	480 ↓
R151	460
R20	442 ↑

Como se observa, de los valores de la table 4-1, del módulo G_{12} inicial y del módulo G_{12} secante, con el valor inicial no queda descrito el comportamiento a cizalladura del material, con lo que sería conveniente obtener las curvas $\tau_{12} - \gamma_{12}$ para realizar la comparación del comportamiento a cizalladura para los distintos ratios.

Usando la solución analítica del problema ideal se puede obtener τ_{12} en función de σ_x :

$$\tau_{12} = -\sigma_x \sin(\theta) \cos(\theta)$$

Y usando la relación entre E_x y G_{12} , E_{11} , E_{22} y ν_{12} , se puede obtener γ_{12} en función de ε_x y σ_x .

$$\gamma_{12} = -\frac{\varepsilon_x}{\sin(\theta) \cos(\theta)} + \sigma_x \left[\frac{\cos(\theta)^3}{\sin(\theta) E_{11}} + \frac{\sin(\theta)^3}{\cos(\theta) E_{22}} - \frac{2\nu_{12}}{E_{11}} \sin(\theta) \cos(\theta) \right]$$

Realizando dichas transformaciones, podemos representar la tensión tangencial frente a la deformación angular.

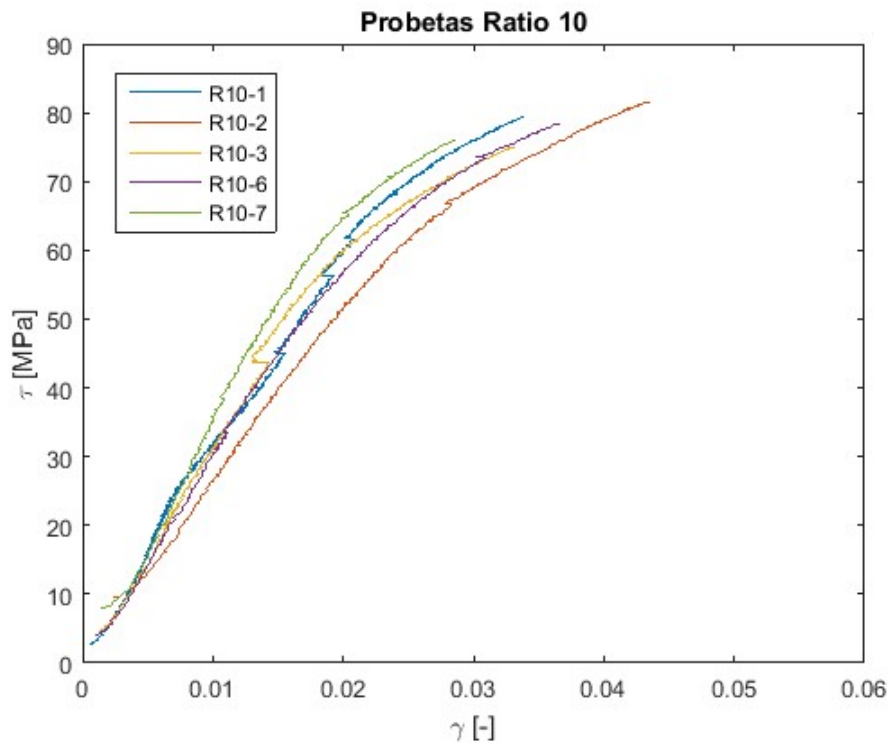
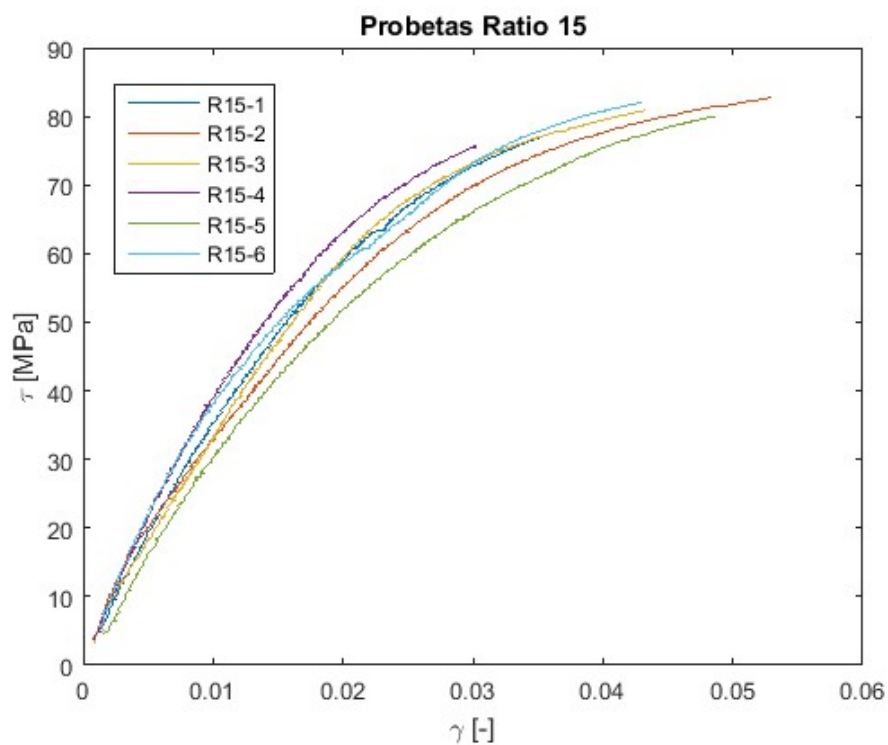
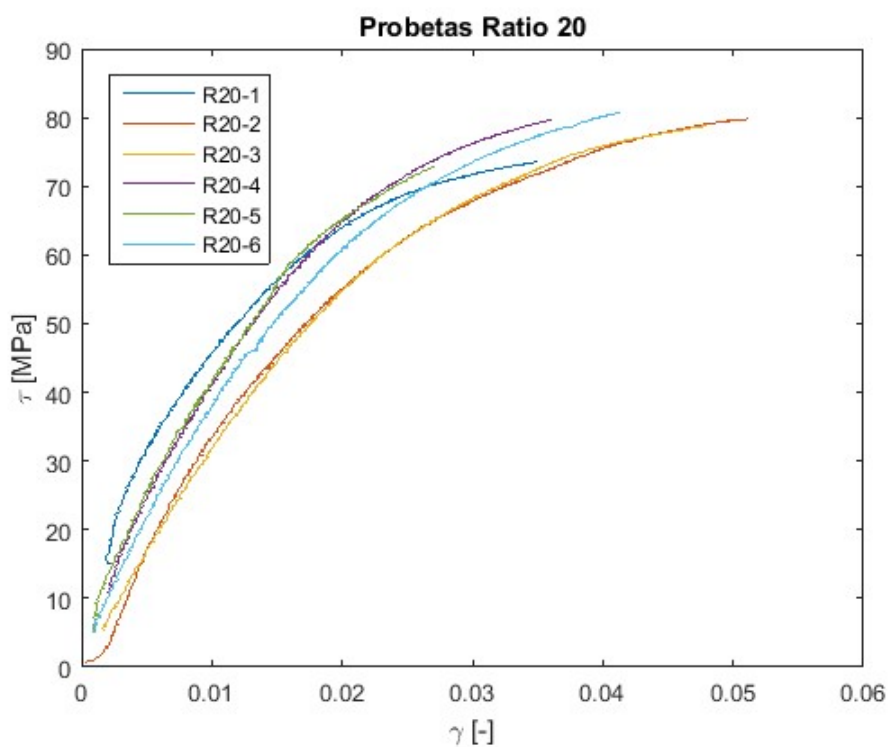


Figura 4-1. Curvas $\tau - \gamma$ ratio 10.

Figura 4-2. Curvas $\tau - \gamma$ ratio 15.Figura 4-3. Curvas $\tau - \gamma$ ratio 20.

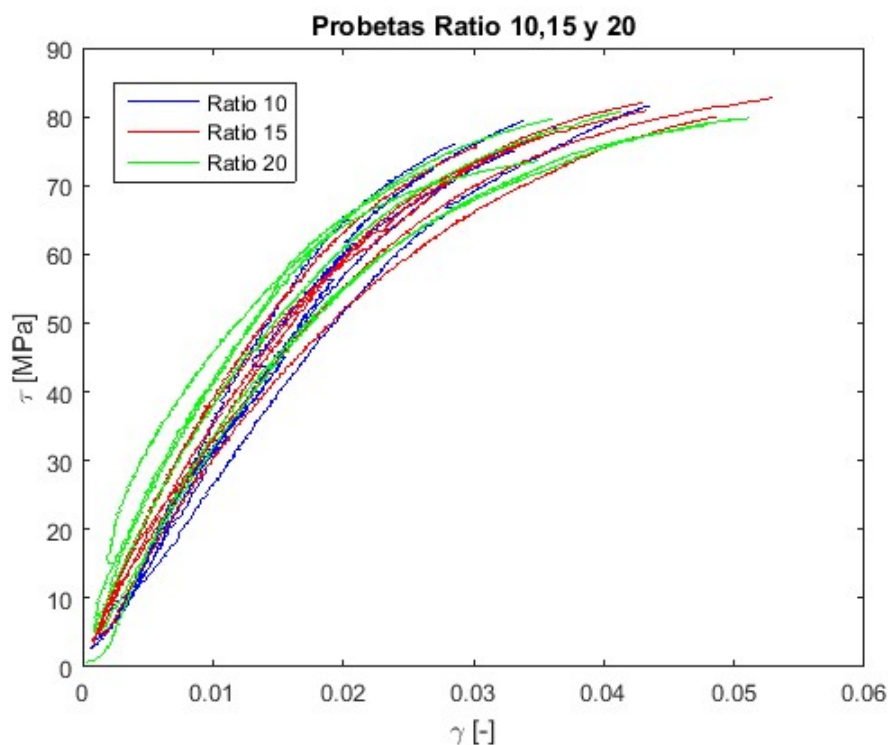


Figura 4-4. Curvas $\tau - \gamma$ ratios 10, 15 y 20.

Podemos apreciar en la tabla 4-1, que el G_{12} va variando a lo largo del ensayo, es decir, en un principio, al igual que el módulo de elasticidad, se mantiene constante, sin embargo, a medida que prosigue el ensayo, la pendiente de la curva decae, al igual que ocurría con el módulo de elasticidad, ya que el tangente siempre era mayor que el secante. Las tensiones alcanzadas se encuentran prácticamente en los 80 MPa y las deformaciones llegan hasta valores del entorno del 5%. Para la obtención de estas gráficas, el ángulo seleccionado para cada ratio ha sido la media de los valores que hemos medido en el laboratorio, es decir, los que se encuentran en la Tabla 4-4.

A continuación, se muestra en la tabla 4-6, la tensión tangencial media a la que rompen los diferentes ratios. Se puede observar que no existe diferencia apreciable en las mismas, estando cerca de los 80 MPa como antes hemos mencionado.

Tabla 4-6. Tensiones tangenciales de rotura.

Identificación	Tensión tangencial de rotura (MPa)
R10	78,14
R151	79,80
R20	77,59

También podemos analizar el porcentaje de probetas que rompen cercanas a los tacones o rompen por la zona central de los especímenes.

Tabla 4-7. Comprobación de zona de rotura.

Identificación	Rotura central	Rotura lateral	Número de probetas	% Rotura central
R10	1	6	7	14,28
R151	1	5	6	16,67
R20	3	3	6	50,00

En la tabla anterior, podemos observar que al aumentar el ratio de las probetas, la rotura por la zona central aumenta considerablemente.

4.3 Variación con el agarre de la mordaza

En la tabla 4-8 se recogen los resultados para los diferentes agarres de las mordazas a las probetas.

Tabla 4–8. Propiedades medias.

Identificación	Tensión de Rotura (MPa)	E_x tangente inicial (GPa)	G_{12} tangente inicial (GPa)	E_x secante (GPa)	G_{12} secante (GPa)
R151	460	62,67	3,473	45,13	2,011
R152	464	58,56	3,116	41,82	1,805
R153	451	56,14	2,865	42,90	1,868

En primer lugar, en lo que respecta a la tensión de rotura del material, al aumentar la distancia de agarre se aprecia un aumento de la misma, sin embargo, si seguimos aumentando, esta tensión de rotura disminuye. En cuanto al módulo de Young tangente, como era de esperar, disminuye, debido a que la flexibilidad de la probeta aumenta.

Realizamos de nuevo la comprobación de los módulos de cizalladura.

Tabla 4–9. Comprobación de cálculos.

Identificación	G_{12} tangente (GPa)	$\overline{G_{12}}$ tangente (GPa)	Error relativo (%)
R151	3,473	3,449	0,69
R152	3,116	3,047	2,21
R153	2,865	2,830	1,22

Tabla 4–10. Comprobación de zona de rotura.

Identificación	Rotura central	Rotura lateral	Número de probetas	% Rotura central
R151	1	5	6	16,67
R152	2	4	6	33,33
R153	1	5	6	16,67

En la tabla 4-10, se puede apreciar que si aumentamos la distancia de agarre de las mordazas el número de probetas que rompen por la zona central aumenta, pero si esta aumenta demasiado, el porcentaje de las mismas vuelve a reducirse.

5 CONCLUSIONES

5.1 Introducción

Este trabajo se centra en la caracterización y obtención de propiedades a través de un ensayo de tracción “Off-Axis”, ya que, presenta una serie de ventajas a la hora de realizar la fabricación, comparándolo con otro tipo de ensayos. Al igual que en todo el trabajo, diferenciaremos las conclusiones en dos apartados, las correspondientes la variación del ratio del espécimen y las conclusiones respecto a la variación del agarre de las mordazas.

5.2 Ratio del espécimen

Se han realizado ensayos de tracción “Off-Axis” a 10° sobre probetas de un material AS4/8552 empleando tres ratios distintos, 10, 15 y 20. Los resultados de resistencia parecen mostrar que la tensión media de rotura (tabla 4-1) disminuye con el ratio del espécimen.

La comprobación de los ángulos de orientación de las probetas ensayadas muestra que se advertían errores angulares, los cuales producirían un estrechamiento entre los valores resistentes pero manteniendo la tendencia observada.

Por otra parte, la comparación de las curvas de los ensayos indican que los ratios más pequeños (10) muestran un comportamiento más rígido, mientras que los ratios más grandes (20) muestran un comportamiento menos rígido.

En cuanto al tipo de rotura observada, el número de roturas centrales aumenta con el ratio, como muestran los resultados registrados en la tabla 4-7.

Por último, en lo que respecta a las curvas $\tau - \gamma$, no se aprecian diferencias significativas. Los tres ratios presentan el mismo comportamiento y las gráficas prácticamente se superponen, aunque exista una cierta dispersión. En cuanto a la tensión tangencial de rotura, tampoco se aprecian diferencias.

5.3 Agarre de la mordaza

Se han realizado ensayos de tracción “Off-Axis” a 10° sobre probetas de un material AS4/8552 para un ratio de 15 variando el agarre de las mordazas (denominadas 151, 152 y 153 en función de la distancia al comienzo del tacón). En lo que respecta a resistencia la tensión de rotura media permanece prácticamente constante, sin embargo, como era de esperar, la flexibilidad de las probetas aumenta a medida que separamos las mordazas de la zona libre del ensayo, es decir, el módulo de elasticidad decrece al retroceder la zona de agarre de las mordazas. Como consecuencia, el módulo de rigidez a cizalladura evaluado a partir del E_x también disminuye.

En lo que respecta a la rotura, al incrementar la distancia de separación “d”, se puede llegar a incrementar el porcentaje de rotura de la probeta por su zona central, sin embargo, si ésta aumenta demasiado, la zona de rotura preferente cambia, siendo más frecuente, la rotura por la zona de los tacones.

REFERENCIAS

- [1] F. París, J. Cañas, J. C. Marín y A. Barroso, Introducción al análisis y diseño de materiales compuestos, Sevilla, 2008.
- [2] Hexcel Corporation, 2016. [En línea]. Available:
http://www.hexcel.com/user_area/content_media/raw/HexPly_8552_eu_DataSheet.pdf. [Último acceso: 2017].
- [3] Juan Carlos Marín, Determinación del módulo de cortadura intralaminar en compuestos grafito-epoxy mediante el ensayo "off-axis", Sevilla, 1998